

文章编号:1005-0523(2019)01-0094-06

一阶变截面桩与等截面桩对比试验研究

方 焘¹,张胤红¹,王 宁¹,郭国君²

(1. 华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013; 2. 南昌铁路天集房地产开发有限责任公司,江西 南昌 330013)

摘要:为研究一阶变截面桩在竖向荷载下的变形和承载特性,选取一组一阶变截面桩与等截面桩进行对比静载试验。试验分析对比了桩身轴力分布曲线、桩端应力及变截面处应力变化曲线、桩侧摩阻力沿桩身分布曲线和桩顶 $P-S$ 曲线。结果表明:一阶变截面桩单位体积材料发挥效率更高,较等截面桩发挥效率提高约 8%;变截面桩荷载传递仍然以侧摩阻力为主,当变截面处土层较弱时,随着荷载的增大变径处土层发生软化,变径处阻力趋于稳定,发挥作用有限。

关键词:变截面桩;静载试验;发挥效率;竖向荷载

中图分类号:U473.1

文献标志码:A

学者杨世忠等^[1]采用各层地基竖向反力系数为常数,建立了位移函数通解及导数的矩阵式,并引入边界条件及桩的连续条件,求解积分常数,理论上论述了在土层呈上硬下软条件下,嵌岩阶梯型变截面桩承受较大轴向荷载时桩身上粗下小可以在适应内力变化的同时充分利用材料而节约成本的优点,但对于非嵌岩阶梯型变截面桩的承载特性并未深入研究且缺乏原位试验研究印证。杨庆光等^[2]采用理论计算并与模型试验结果对比分析的方法研究了变截面管桩沉桩阻力与等截面管桩之间的差异和阶梯型变截面管桩沉桩阻力与入土深度的关系。杨有莲等^[3]以实际工程中的钻孔变截面灌注桩为例,通过有限元程序进行模拟,对变截面钻孔桩及等截面桩受竖向荷载下的荷载传递机理和侧摩阻力进行了分析研究,并就变截面桩轴力及侧摩阻力在变截面处的突变进行了分析,但无试验对比分析,研究方法比较单一。梁韵、任士房等^[4]从大直径变截面桩实际受力状态出发推导了大直径变截面桩竖向承载力及沉降量的计算公式,但没有对桩的受力和变形进行系统分析。方焘、刘新荣等^[5-6]通过室内模型试验对阶梯型变截面桩的变截面位置、截面比对试桩的承载力及变形特性的影响进行了分析研究,认为阶梯型变截面桩存在最佳变截面位置及变截面比,而现场试验论证及数据对比支撑依然不足。Enrique Justo 等^[7]提出了一种用于分析在预制桩桩端延伸出一段微型桩的变截面桩的弹塑性模型,在 Mindlin 方程^[8]基础上减少部分参数对该模型计算并与现场测试、数值分析结果对比取得了良好的效果。刘杰等^[9-10]通过模型试验认为楔形桩加固软土地基效果优于等截面桩,并建立算例认为楔形桩倾角的增大提高了桩侧摩阻力,进而增强桩土作用使承载力提高。刘春阳^[11]运用 ANSYS 大型有限元软件对钢板桩和混凝土桩在动水压力下的受力分析结果进行对比,认为动水阻力对结构影响可以忽略。

虽然国内外学者从理论分析到模型试验对变截面桩开展了系列研究,但对于阶梯型变截面桩的研究并

收稿日期:2018-06-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51568021,51868021);江西省交通运输厅基金项目(2017D00035);江西省教育厅基金项目(GJJ170363)

作者简介:方焘(1976—),男,副教授,博士,硕士生导师,研究方向为岩土工程、道路与铁道工程。

通讯作者:王宁(1983—),男,讲师,博士,研究方向为桩基工程。

不系统,尤其在阶梯型变截面桩现场试验的相关研究方面更是乏陈可指。本文为研究阶梯型变截面桩的承载特性及变形规律分别对一根变截面桩和一根等截面桩进行静载试验,对其竖向静载下的内力变化和荷载传递及桩土作用规律进行现场试验,可对现有的理论及模型试验成果进行验证和进一步探讨,为该型桩的研究成果进行有益补充及提供现场试验支撑。

1 试验场地概况

试验场地位于南昌市某在建住宅小区,在本次勘探揭露深度范围内,场地内岩土层主要由人工填土,冲积成因的粘土、细砂、角砾及风化千枚岩等沉积物构成。试桩场地土层分布情况及土层的物理力学参数由室内试验得到,具体参数如表 1。

表 1 土层物理力学参数
Tab.1 Physical and mechanical parameters of soil

桩入土深度/m	地层	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	密度/(g/cm ³)	压缩模量/MPa	含水率/%
0~1	粉质粘土	18.64	30.3	2.0	6.27	11.6
1~2	粘土	23.21	32.5	1.89	6.45	11.0
2~3	粘土	59.1	22.3	1.92	6.38	10.3
3~4	粉质粘土	43.88	26.4	1.93	6.74	10.6
4~6	淤泥质粉质粘土	27.6	24.2	1.96	6.87	11.4

2 试验概况

2.1 桩身设计

试验分别设计 1 根等截面桩和 1 根一阶变截面桩,两根桩皆为人工挖孔桩。等截面桩桩身长度为 6 m,桩径 1 060 mm;阶梯型变截面桩长 6 m,自桩顶以下 2.8 m 段桩径为 1 060 mm,2.8~6 m 段桩径为 850 mm。试桩分别对称布置 12 根 $\Phi 14$ 主筋,箍筋为 $\Phi 8@100/250$,桩身由强度等级为 C35 的混凝土现浇而成。

2.2 加载方法

试验采用慢速维持荷载法,此方法是通过千斤顶将堆载平台上的荷载缓慢的作用在试桩上。试验荷载分级加载,每级荷载施加后的第一个小时内分别按第 5,15,30,45,60 min 测读桩顶沉降量,之后每隔 30 min 测读 1 次桩顶沉降量。每级荷载作用下试桩的沉降达到稳定时(沉降量小于或等于 0.1 mm/h,并且连续出现 2 次),可继续进行下一级加载。本次试验中 2 根试桩均以每级荷载 50 kN 进行分级加载,最大荷载为 1 600 kN。

2.3 设备安装与测试

1) 试验加载。试验反力由压重平台反力装置提供,压重约 3 500 kN,加载设备为量程 2 000 kN 的液压千斤顶。千斤顶合力中心与试桩截面形心重合,反力大小由经过标定的 YBY-2 000 kN 型荷重传感器直接测定,传感器与钢梁通过垫块间接接触防止损伤传感器,千斤顶与试桩接触处放置钢板补强。

2) 基准系统。基准系统由基准梁和基准桩组成。为保证位移测量不受试验及其他因素影响,基准桩由 4 根直径 60 mm 的钢管打入土中,基准桩中心距试桩约 4.5 m。基准梁利用锁扣与基准桩牢固连接。

3) 荷载和位移的量测。试验荷载通过放置在液压千斤顶上经过标定的荷重传感器(0~2 000 kN)测定,荷载大小由与传感器相连的精密数字测量仪读取。桩身沉降采用武汉岩海 JYC 静载仪测量,每级荷载下的

沉降量和累计沉降量可由仪器直接读取。试验开始前将位移计与磁力支架连接并固定在基准梁上,使位移计与桩顶钢垫板接触良好,位移计绕桩顶钢垫板形心对称布置4个。

4) 钢筋计与土压力盒的埋设。为得到在不同荷载级别下轴力沿桩身深度的分布情况和桩端、变截面处所受压力,分别在桩内不同深度安装了钢筋计,在桩端和变截面位置安装了土压力盒。如图1所示,变截面桩沿桩身在0.15~5.95 m的不同深度共安装了9个,等截面桩在0.15~5.4 m的不同深度共安装8个,且在变截面桩2.65 m和2.95 m深度处分别对称布置2个;桩端土压力盒绕截面形心每120°布设1个,变截面处对称布置4个,钢筋计所在横截面距桩顶距离如表2所示。

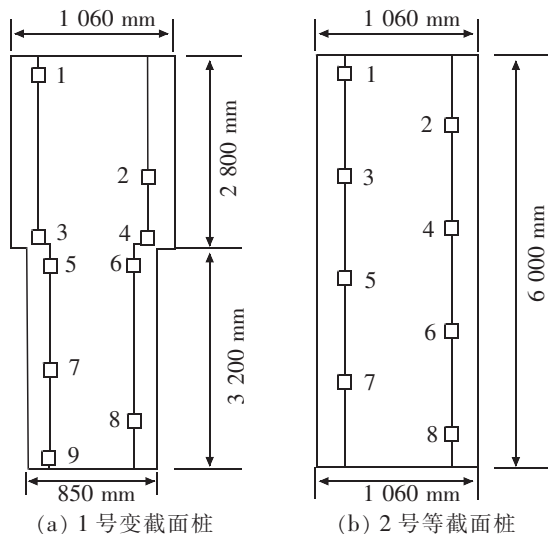


图1 钢筋计布置图

Fig.1 Distribution of steel stress meter

表2 钢筋计安装深度
Tab.2 Installation depth of steel stress meter

变径桩	序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	深度/m	0.15	1.65	2.65	2.65	2.95	2.95	4.45	5.20	5.95
直桩	序号	1	2	3	4	5	6	7	8	
	深度/m	0.15	0.90	1.65	2.40	3.15	3.90	4.65	5.40	

3 试验结果与分析

3.1 桩顶 P-S 曲线

图2为两试桩桩顶荷载位移曲线,对比可见两桩沉降曲线皆呈缓变形式,未出现极限荷载,桩基没有发生破坏。根据《建筑基桩检测技术规范》对于缓变型曲线桩基极限承载力的确定方法,此次试验一阶变截面桩与等截面桩的极限承载力分别为1188,1363 kN,故桩顶截面相同时等截面桩的竖向承载力更大。为了更好地比较两桩在受竖向荷载时其单位体积材料发挥情况,分别将荷载达到极限承载力时和桩顶沉降量为4,20,40 mm时所对应的桩顶荷载Q与桩身体积V之比作为一个比较因子 QV^{-1} ,即

$$QV^{-1} = \frac{Q}{V}$$

式中:Q为不同条件下对应的桩顶荷载;V为桩身的体积; QV^{-1} 为比较因子,表示单位体积承载力。

具体结果如表3所示,在桩顶荷载达到极限承载力时和桩顶沉降量为4,20,40 mm时等截面桩的单位体积材料承载力分别为:257.55,107.71,220.70,274.75 kN/m³,而变截面桩分别为277.27,116.70,248.80,316.72 kN/m³。比较发现同标准下,阶梯型变截面桩单位体积材料承载力始终大于等截面桩,且极限承载力下变截面桩单位体积材料发挥比等截面桩提高约8%,由此说明阶

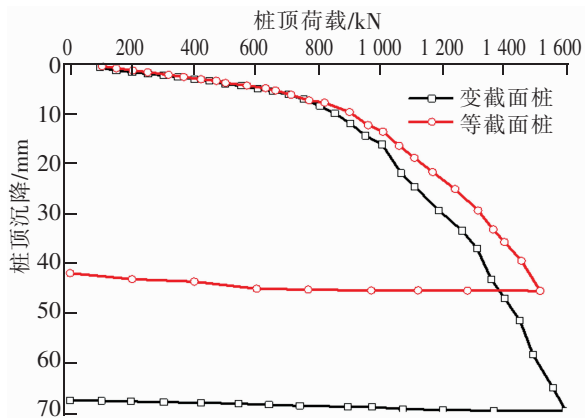


图2 荷载-沉降曲线

Fig.2 Load-settlement curves

梯型变截面桩单位体积材料的承载力优于等截面桩。

表 3 不同标准下的单位体积承载力
Tab.3 Unit volume bearing capacity under different standards

桩型	极限承载力		4 mm		20 mm		40 mm	
	Q / kN	$QV^{-1}/(\text{kN}/\text{m}^3)$	Q / kN	$QV^{-1}/(\text{kN}/\text{m}^3)$	Q / kN	$QV^{-1}/(\text{kN}/\text{m}^3)$	Q / kN	$QV^{-1}/(\text{kN}/\text{m}^3)$
变截面桩	1 188	277.27	500	116.70	1 066	248.80	1 357	316.72
等截面桩	1 363	257.55	570	107.71	1 168	220.70	1 454	274.75

3.2 桩身轴力分布特征

等截面桩和变径桩的轴力随深度变化曲线见图 3 和图 4。对比两试桩轴力沿桩身分布曲线,阶梯型变截面桩在 0~2.8 m 深度范围内呈线性大幅减小的现象,而变截面以下桩身轴力随深度变化较缓。等截面桩在 4.5 m 截面位置之上变化趋势较缓,且在 0~2.8 m 深度范围相同荷载级别下轴力值小于变径桩,2.8 m 以下同级荷载下轴力大小相当。随着荷载的增加,桩土产生相对位移,桩侧摩阻力发挥作用致使桩身轴力递减。对于变截面桩,在桩入土深度大于 2.8 m 时由于桩径变小,变径处部分土层压缩产生阻力导致轴力增大,当桩顶荷载继续增大变截面处土体压缩达到极限被破坏,变截面位置以下土体侧摩阻力进一步发挥,轴力减小。可见当变截面桩变截面处土层工程性质一般时,阶梯型变截面桩变径处阻力发挥效果有限。

从图 3 和图 4 中还可以观察到,变截面桩和等截面桩分别在 5.2 m 与 4.6 m 左右出现急剧减小的现象。两试桩均为人工挖孔桩,现场施工时由于地层原因桩下部分产生局部塌孔现象且采用毛竹护壁,造成成桩后下部桩体局部扩大,且表面凹凸不平。故在这两处截面位置曲线出现骤减现象,这与扩径桩的相关研究成果^[12]相符。

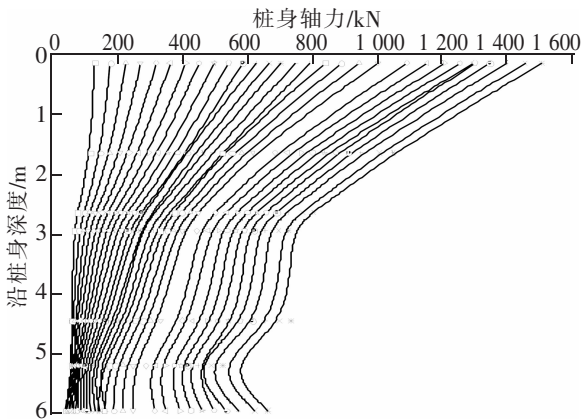


图 3 阶梯型变截面桩桩身轴力随深度的变化
Fig.3 Variation of axial force with depth of step tapered pile

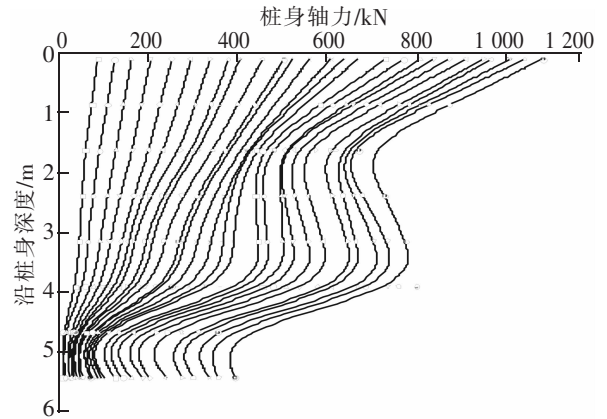


图 4 等截面桩桩身轴力随深度变化
Fig.4 Variation of axial force of equal-diameter pile with depth

3.3 桩侧摩阻力

通过桩身埋设的钢筋计计算出桩侧摩阻力如图 5、图 6。当荷载较小时两试桩侧摩阻力变化趋势基本一致,随着荷载的进一步加大,在 0.15 m 截面处等截面桩侧摩阻力曲线变化激烈。对于阶梯型变截面桩,一方面上段桩径为 1 060 mm,桩径较大受载桩身压缩量较小致使桩土相对位移较小,另一方面变径处随荷载的增大也将发挥端承作用;因此侧摩阻力较小。而等截面桩桩身压缩量随荷载增加,桩土相对位移也随荷载增加而增大,侧摩阻力较大。对于变截面桩上部扩径段桩身,侧摩阻力随桩身向下几乎呈线性增大,且深度为 2~2.8 m 段在同级荷载下增幅为直径为 850 mm 段的 2 倍以上,在变截面处最大侧摩阻力约为等截面桩相同截面位置最大摩阻力的 1.5 倍。由于地层变化不大,侧摩阻力受地层影响不明显。桩侧摩阻力在桩土产生相对位移趋势时开始发挥,随着荷载增大侧摩阻力增大,总的来看侧摩阻力发挥作用高于端阻力及变径处端阻力。

在桩身轴力分布部分提到因施工原因造成下部桩体局部扩大,变截面桩和等截面桩桩身侧摩阻力分别在桩入土深度为 5.2 m 与 4.6 m 左右出现增大现象也说明了桩径扩大及侧壁凹凸会使侧摩阻力增大。

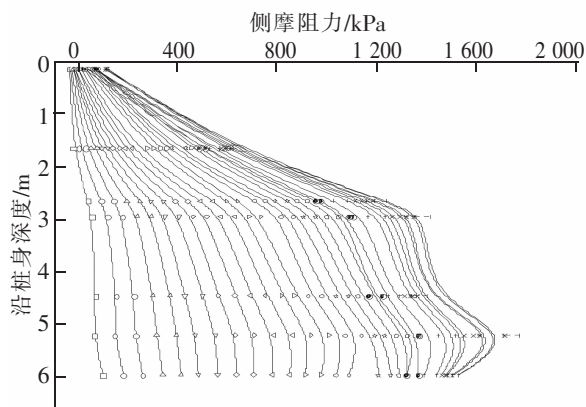


图 5 阶梯型变截面桩侧摩阻力–深度曲线

Fig.5 Side friction resistance–depth curve of step tapered pile

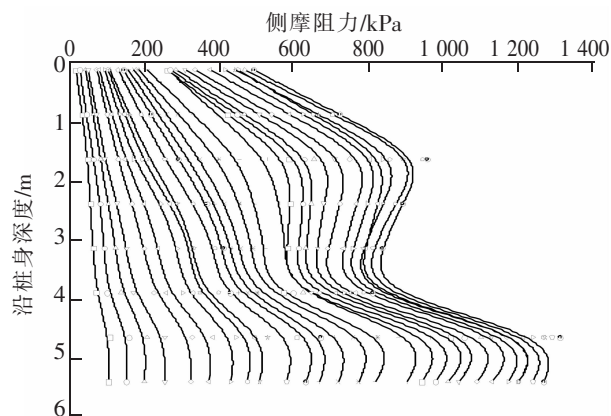


图 6 等截面桩侧摩阻力–深度曲线

Fig.6 Side friction resistance–depth curve of equal-diameter pile

3.4 桩端阻力

试验通过在阶梯型变截面桩变截面处及两试桩桩端埋设土压力盒得到加载过程中变径处及桩端阻力大小,桩端应力和变截面处应力曲线如图 7。从图中可以看到两桩桩端应力曲线和变径处应力曲线线型大体相同,都随荷载增大而增大,皆呈现出非线性变化。不同的是加载前期等截面桩桩端应力变化速率小于阶梯型变截面桩,随着荷载的增大,桩端应力变化速率与加载前期相反,此外,试验过程中阶梯型变截面桩桩端应力始终大于等截面桩;因此相同荷载级别下,阶梯型变截面桩桩端桩土作用大于等截面桩。

对于阶梯型变截面桩,变截面处应力与桩端应力在荷载为 0~800 kN 时曲线近乎重合,随着荷载的增大,桩端应力急剧增大而变径处应力变化较缓,当荷载大于 800 kN 时曲线出现分离,随着荷载进一步加大桩端应力继续增大而变径处趋于稳定。经计算发现加载变径处阻力占桩顶荷载比例仅为 4%且不再增加。

此外,从图中可以观察到等截面桩桩端应力与变截面桩变径处应力在荷载约为 1 200 kN 时出现交点,可见当荷载达到 1 200 kN 时桩土作用力较大,变径处土层已发生破坏。

4 结论

1) 桩顶截面相同时等截面桩承载力更大,而阶梯型变截面桩在单位体积材料承载力发挥方面优于等截面桩。

2) 阶梯型变截面桩的荷载传递方式与等截面桩有所区别,但仍以侧摩阻力为主,当变截面处土层工程性质一般时,变径处阻力发挥效果有限。

3) 阶梯型变截面桩侧摩阻力发挥先于端阻力,随着荷载增大,端阻力作用越来越大,变径处阻力趋于

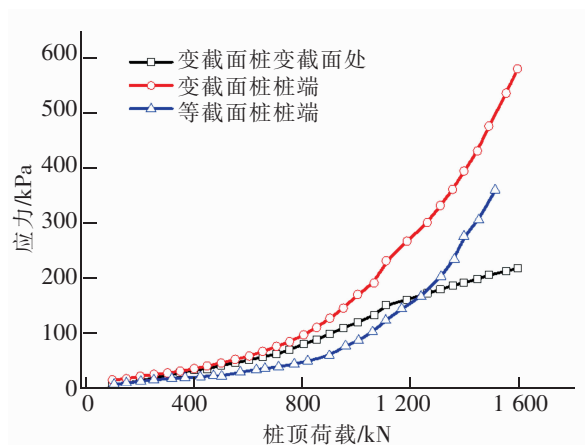


图 7 桩端及变截面处应力曲线

Fig.7 Stress curve of pile tip and position of variable diameter

稳定。阶梯型变截面桩桩端桩土作用更加剧烈,随着荷载的增大,变径处土层较桩端提前发生破坏,变径处桩侧土软化。

从试验结果看,在桩顶截面相同时阶梯型变截面桩的承载力较等截面桩低,同级荷载下桩基沉降反而较大,但阶梯型变截面桩在材料发挥方面仍然具有优势,当地层较差时在变截面处端阻力发挥效果有限,侧摩阻力仍然起主导作用,与扩径桩及楔形桩有所区别。

参考文献:

- [1] 杨世忠,李杨,莫志刚. 嵌岩变截面桩的应用与计算[J]. 贵州工业大学学报:自然科学版,1999(4):100-106.
- [2] 杨庆光,田捷,刘杰. 阶梯型变截面管桩沉桩阻力计算方法与模型试验研究[J]. 工业建筑,2015,45(11):104-110.
- [3] 杨有莲,朱俊高. 钻孔变截面灌注桩的荷载传递特性[J]. 水利水电科技进展,2008(3):37-39.
- [4] 梁韵,任士房,耿大新,等. 大直径变截面桩竖向承载力及沉降算法研究[J]. 华东交通大学学报,2009,26(4):34-38.
- [5] 方焘. 阶梯型变截面桩变形及承载特性研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
- [6] 方焘,刘新荣,耿大新,等. 大直径变径桩竖向承载特性模型试验研究(I) [J]. 岩土力学,2012(10):2947-2952.
- [7] JUSTO E,VAZQUEZ B M,JUSTO J L,et al. An elastoplastic model for the analysis of a driven pile extended with a micropile[J]. Computers and Geotechnics,2017,87:10-19.
- [8] MINDLIN R D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid[J]. Physics,1936,7(5):195-202.
- [9] 刘杰,何杰,闵长青. 楔形刚性桩与桩周土的非线性相互作用[J]. 铁道学报,2010,32(2):137-140.
- [10] 刘杰,何杰,闵长青. 楔形桩与圆柱形桩复合地基承载性状对比研究[J]. 岩土力学,2010(7):2202-2206.
- [11] 刘春阳,张淑华,陈光明,等. 基于 ANSYS 的双排钢板桩海堤受力特性分析[J]. 华东交通大学学报,2016,33(2):106-113.
- [12] 杨果林,陈似华,林宇亮. 大直径扩径桩与等截面桩对比试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2009,6(2):34-37.

Comparative Experimental Study Between First-Order Variable Diameter Piles and Equal Diameter Piles

Fang Tao¹,Zhang Yinhong¹,Wang Ning¹,Guo Guojun²

(1. School of Civil Engineering and Architecture,East China Jiaotong University,Nanchang 330013,China;

2. Nanchang Railway Tianji Real Estate Development Co.,Ltd.,Nanchang 330103,China)

Abstract: In order to study the deformation and bearing characteristics of first-order variable diameter pile under vertical load,a set of first-order variable diameter piles and equal diameter piles were selected for comparative static load test. This test made an analysis by comparing the axial force distribution curve of the pile body,the stress at the pile end and the stress variation curve at the variable section,the pile side frictional resistance along the pile body distribution curve and the pile top $P-S$ curve. The results showed that the first-order variable-section piles had higher efficiency per unit volume of material,8% higher than that of equal diameter piles. The load transfer of the variable-section piles was still dominated by the lateral friction. When the soil layer was weak at the variable section,it softened at the variable diameter as the load increased,and the resistance at the variable diameter tended to be stable,with limited function.

Key words: variable diameter pile; static load test; efficiency; vertical load